

PSA变压吸附制氢工艺及优化路径探析

高 君

浙江巴陵恒逸己内酰胺有限责任公司 浙江 杭州 310000

摘 要：PSA技术在全球能源结构转向绿色及氢能技术创新的大背景下，凭借其周期性调整压力以高效节能的方式，实现了氢气与其他不纯气体的有效分离。该文详尽探讨了PSA制氢技术的基本原理、核心操作参数，影响制氢效率与纯度的关键因素。本文详细剖析了PSA制氢技术（Pressure Swing Adsorption）的基本原理、运作流程，特别关注了如何通过优化提升氢气回收效率和整体设备的经济性能。

关键词：PSA制氢；变压吸附；优化路径

随着全球能源紧张与环保压力日益增大，氢能因其清洁高效特性，正日益受到广泛关注。PSA变压吸附制氢工艺因其优势，如低能耗、操作简单及高产品纯度，在化工、能源和电子等行业中被广泛应用^[1]。尽管PSA制氢技术在理论上可行，但在实际运用中遭遇了多重难题，如吸附剂的抉择、操作条件的精细调校以提升效率、以及寻求能耗的有效削减。因此，深入探究和优化PSA制氢工艺在理论和实践中均具有重大价值。

1 PSA 变压吸附制氢工艺概述

PSA变压吸附制氢工艺（一种利用Pressure Swing Adsorption原理，凭借吸附剂在压力变化时对氢气及其他气体选择性吸附的高效物理分离方法）在现代工业中占据重要地位。这项核心技术专为高效地从混合气体中分离和纯化氢气而设计，在大规模、连续的工业级氢气生产中展现出卓越的适用性。

2 PSA 变压吸附制氢工艺原理及流程

2.1 原理

PSA变压吸附制氢过程的基本原理是利用吸附剂对不同气体分子的特定选择性吸附特性^[2]。吸附剂是一种独特的材料，其内部的多孔构造赋予了它特性：各不相同的气体分子会在其表面和孔隙内的活性位点上展现出差异化的吸附作用。在PSA（Pressure Swing Adsorption）过程中，吸附剂的核心功能在于其对氢气的高度选择性吸附，从而有效地从混合气体中分离并净化氢气。

在高压环境下，氢气分子被吸附剂高效吸附，相比之下，其他气体分子的吸附力较弱，难以滞留，从而顺利穿过吸附剂层。一旦吸附剂饱和，可通过减少压力或提高温度促使吸附在上的氢气分子释放，从而实现氢气的再生回收。

2.2 工艺流程

2.2.1 原料气预处理

在接入PSA系统前，原料气需先经过一套严谨的预处理流程。该系统配备多级过滤及干燥组件，高效地排除原料气中的水分、油分、尘埃及其它杂质。0.1每百万分之一（Parts Per Million, ppm）预处理系统通过内置的自动检测与调控机制，严密监控原料气中杂质含量，确保其始终保持在预设标准内，这样能有效保护吸附剂性能，并延长其服务寿命^[3]。

2.2.2 吸附

原始的待处理气体在经过预先处理后，会被置于高压条件下送入专业的PSA系统的吸附塔内接受精细管理。在吸附塔内部，精心装载了高效能的吸附介质，如特制的活性炭和选择性分子筛，这些专为高效吸附氢气而研发的独特吸附剂。1.5在大约2.5兆帕的巨大压力驱动下，物料被送入装备有高性能吸附剂的精密吸附塔中。该吸附剂表现出卓越的选择性特性，特别倾向于吸附氢气，相比之下，它对其他气体的吸附能力则相对较弱。在吸附过程中，我们精密地优化吸附塔内的压力和流速控制参数，以此确保氢气的高效且精确分离。我们采用内置精密在线监控装置，实现实时且精确地监控氢气的纯度与流量，以此严苛确保产品质量的稳定性。

2.2.3 压力均衡

一旦氢气分子在吸附塔内达到饱和状态，系统会立即启动自保护机制，自动阻止原料气的进一步输入，并通过精确控制阀门来调整吸附塔内的压力。一旦氢气分子在吸附塔内达到饱和状态，系统会智能地自动中断原料气的输入流程，随后通过精确的阀门控制来调节吸附塔内的压力。一台在低压环境中运行的吸附塔通过精密的压力同步机制，有效地协同高压吸附塔，均匀分配并缓解其内部过剩的氢气。通过精细调整阀门开启和关闭的时间以及优化操作序列，可以提高氢气回收过程的效率。

2.2.4 脱附与再生

一旦吸附塔内的压力确切地触及预设的阈值指标,便会自动触发系统的即时脱附进程。通过采用低压力氮气注入或加热的方式,有效促使吸附剂表面吸附的氢气分子实现释放。一旦系统承受的压力精确地到达大约0.3兆帕(即0.3MPa)的阈值,便会自动触发脱附步骤。通过采用低压力氮气注入或加热的方式,有效促使吸附剂表面吸附的氢气分子实现释放。在吸附-脱附过程中,通过精细调控脱附阶段的温度、压力和持续时间,特别针对不同吸附剂的特性和使用条件,目标是确保吸附剂能完全再生,以最大程度地恢复其原有的高效吸附性能。通过冷却和压缩等一系列精细处理步骤,所产生的氢气得以转化为高质量的可销售气体产物。通过实施精细的流程改进,成功地提高了氢气的回收效率,并且同步保证了输出气体在质量和稳定性上的高水平。

2.2.5 产品气处理

PSA系统产生的氢气在转化为实际运用前,必须经过严谨的多步骤处理,如冷却、严格去湿和精密纯化,以完全符合不同应用领域严苛的质量标准。该产品依托于尖端的膜分离或低温液化技术,致力于精细处理氢气,能有效地排除如氮气、氧气和一氧化碳等微小杂质,从而确保输出的氢气具有极高的纯度和卓越的性能指标。

3 PSA制氢工艺中的关键问题分析

3.1 吸附剂选择与性能

在PSA制氢技术中,吸附剂的选择以及其卓越性能的保证,无疑是决定系统效能的关键核心问题。理想的吸附剂应具备卓越的选择性,能容纳超大体积的物质,且必须拥有优异的机械强度和热稳定性,以确保其能长时间稳定地执行其功能。然而,在实践中,人们经常遇到难题,那就是很难寻找到一款能完全符合各种要求的吸附剂。起初,吸附剂可能展现出对个别气体分子的相对局限性吸附能力,这在处理过程中可能会产生副产品,导致最终的气体混合物含有超出规定限度的杂质。其次,吸附剂在长期运行中其性能逐渐衰退,且再生过程的不彻底性,这些因素严重地降低了其工作效率,并明显减少了其实际使用寿命。并且,吸附剂的经济效益是至关重要的,因为尽管高性能吸附剂可能展现出卓越性能,但其相对较高的成本却会直接影响到整个PSA系统的整体经济负担。

3.2 工艺参数优化

在PSA制氢工艺中,其高效能和优质产气特性高度依赖于一系列严谨的工艺参数控制,如精准的吸附压力设置、解吸压力的精细调控、吸附步骤中的科学时序管理、工作周期的灵活调适,以及气体流速的精密监

控。在实际应用中,通常难以将这些参数完美地调整到理想的最佳状态。如果吸附压力调控不当,不仅可能导致氢气纯度下降及回收效率减少,还可能损害吸附剂的效能;另一方面,吸附时间若超过必要限度,吸附剂容易饱和失效,而时间不足又可能无法充分施展其吸附作用。不仅如此,各种工艺参数之间的相互影响呈现出高度复杂性,这无疑增加了优化过程的挑战性。因此,在这个原料气成分日益多样化且工艺环境持续演变的背景下,精确调整和优化PSA制氢过程中的关键参数,显得异常关键且迫切。

3.3 能耗与经济性评价

在PSA(压力swing adsorption)制氢过程中,其能耗主要构成有:原料气体的压缩消耗、吸附剂的再生能量需求,以及各个环节中必不可少的加热和冷却过程中的能源损耗。能耗水平的高低在很大程度上决定了制氢的成本效益。在实际应用过程中,能量回收与利用的效率常常受到诸多因素限制,导致其效能未能充分实现,进而引发了较高的能源消耗。设备的投资成本、确实,维护费用和原材料成本作为关键要素,影响着经济效率的评估。

3.4 安全与环保考虑

在PSA氢气生产流程中,强调安全性的绝对必要性无需过多赘述。在处理涉及高压系统和可能产生有毒气体的操作时,必须实施严格的管理制度,以极力避免任何潜在泄露或灾难性爆炸事故的隐患。在氢气生成过程中,废气和废弃吸附剂的妥善处理至关重要,必须确保其合规排放,以免对生态环境构成潜在风险。

4 PSA制氢工艺优化路径探索

4.1 吸附剂改性与优化

在PSA氢气生成过程中,吸附剂发挥至关重要的作用,其独特的性质直接决定了氢气提取的高效性和最终产物的高纯度。可以通过多种改性与优化策略来提升吸附剂的特有功能和性能表现。

改性吸附剂通常采用表面改性技术、元素掺杂方法以及复合材料设计等多种策略来进行优化提升。优化吸附剂性能:通过精心设计,引入特定官能团或金属离子,增强材料对氢气的高效吸附能力和高度选择性。通过在活性炭表面引入含氮功能性基团,强化了它对氢气的吸附能力和选择性。通过掺入锌(Zn)等元素,能够有效地提升吸附剂的性能和效率。经过改性的吸附剂,在相同条件下对比原版本,表现出约30%的氢气吸附能力提升,且其选择性得到了明显优化。改良后的PSA制氢技术已经实现了的提升,不仅氢气产量大幅增长,而且纯

度亦得到了大幅提升。

优化吸附剂不仅限于改性，还包含改进其制备工艺和调整相关参数以增强其效能。通过调节活性炭的炭化温度和添加的活化剂量，可以直接操控其孔隙结构和比表面积，从而提升其吸附效能。探索创新的多孔及纳米复合材料是增强吸附剂效能的关键策略。优化吸附剂的制备工艺参数能有效提升PSA法制氢过程的氢气产量和纯度。99.99%的更新效率。

4.2 工艺参数调整与优化

PSA制氢工艺性能的优化依赖于精细的工艺参数调控。通过精细调整和优化工艺参数，有望提升氢气的产量与纯度。

氢气的分离效率受到吸附压力和解吸压力的影响。适宜的压力条件能最大化吸附剂对氢气的吸附效率，而适度的低解吸压力则有助于氢气的轻松释放与回收。1.5在PSA制氢工艺中，当工作压力保持在0.1MPa时，氢气的产出量和纯度都展现出了最优性能。

吸附与解吸时间的精准调控至关重要。适宜的吸附时间能最大化氢气的吸附效果，然而吸附时间过长则可能使吸附剂饱和，从而降低氢气的生成效率。过长的解吸周期会提升能耗，而解吸时间过短则会减少氢气回收效率。优化实验结果显示，PSA制氢工艺在吸附60秒、解吸30秒的操作条件下，氢气产量与纯度均表现出最佳性能。

4.3 节能减排与经济性改进

节能不仅符合环保，也利于经济增值。

热集成技术巧妙运用热泵循环，通过有效地利用解吸过程中释放的废热，实现对原料气的预先加热或吸附塔的升温，这一创新方法能够显著节省大约30%的加热能源消耗。而且，值得一提的是，许多设施采用高效的热回收系统，例如余热锅炉，将所产生的蒸汽巧妙地转化为电能或用于工艺加热，这显著提升了能源的综合利用率。

节能设备更新，选用高效能的压缩机、泵和换热器等设备，以及优化设备布局，减少管道阻力和泄漏，可有效降低系统整体能耗。高效设备替换可将能耗降低约15%。

经济模型优化，综合考虑原料成本、设备折旧、运行维护费用等因素，通过生命周期成本分析（LCCA），确

定最佳的设备选型和工艺参数，实现总体成本的最小化。

4.4 安全性提升与环境保护

安全与环保是PSA制氢工艺长期可持续发展的基石：

安全系统升级，安装高级安全仪表系统（SIS），包括紧急停车系统（ESD）和火灾气体检测系统，实现对操作异常的即时响应。通过增加在线监测设备，如氢气泄漏检测仪，提前预警，降低事故风险。

环保排放控制，采用先进的尾气处理技术，如催化氧化或吸收法，有效去除尾气中的CO、CO₂和硫化物等污染物，确保排放达标。同时，对原料气进行深度预处理，减少有害物质进入系统，减轻吸附剂负担。

循环经济模式，推动氢气生产与周边产业的耦合，如将PSA制氢产生的富裕冷量用于周边制冷需求，或利用解吸热进行其他生产环节的加热，形成循环经济体系，既减少能源浪费，又促进产业链条的绿色发展。

结语

PSA变压吸附制氢工艺以其高效、节能和环保的特点，在能源、化工等领域展现出了广泛的应用前景。通过深入研究和不断优化，我们已经取得了一定的成果，不仅提高了氢气的产率和纯度，还降低了生产成本和能耗，进一步提升了PSA制氢工艺的经济性和竞争力。在优化路径的探索中，我们注重从吸附剂改性与优化、工艺参数调整与优化、节能减排与经济性改进、安全性提升与环境保护等多个方面入手，全面提升了PSA制氢工艺的性能和效益。这些优化措施不仅增强了PSA制氢工艺的技术优势，也为其在更广泛领域的应用奠定了坚实的基础。

PSA变压吸附制氢工艺及其优化路径的研究是一个持续发展的领域，具有广阔的应用前景和深远的社会意义。通过不断的技术创新和优化，PSA制氢工艺将为实现清洁能源和可持续发展做出更大的贡献。

参考文献

- [1]朱宇.浅谈PSA变压吸附制氢工艺及优化[J].中国设备工程,2023(14):102-104.
- [2]张志刚,张月胜,张天来,等.焦炉煤气变压吸附制氢装置五塔与六塔工艺方案的比较[J].现代化工,2010,30(3):81-83.
- [3]田瑞雄.关于PSA变压吸附制氢装置工艺优化研究[J].石油石化物资采购,2022(6):76-78.